

文章编号:1004-7220(2010)06-0433-06

## Mimics 和 Geomagic 辅助下 建立固定义齿的有限元模型

王野平<sup>1</sup>, 林小英<sup>1</sup>, 周慧峰<sup>2</sup>

(1. 同济大学 机械工程学院, 上海 201804; 2. 同济医院, 上海 200065)

**摘要:** **目的** 建立固定义齿的三维有限元模型,为后续的牙周组织的生物力学分析提供数字模型。**方法** 利用 Mimics 医学影像三维重建软件和 Geomagic studio 逆向工程软件对 CT 图像进行处理,并运用 UG NX 进行实体建模及有限元网格划分。**结果** 建立了包含牙槽骨、基牙、牙周膜、固定义齿的三维有限元模型。**结论** 直接运用牙齿原始数据建模,一定程度上可以避免数据丢失,减少模型失真,所得模型具有较好的几何相似性。

**关键词:** CT 扫描; 固定义齿; 有限元方法; 生物力学

**中图分类号:** R318.01 **文献标志码:** A

### Finite element model of fixed denture aided by Mimics & Geomagic

WANG Ye-ping<sup>1</sup>, LIN Xiao-ying<sup>1</sup>, ZHOU Hui-feng<sup>2</sup> (1. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Tongji Hospital, Shanghai 200065, China)

**Abstract: Objective** To establish a 3D finite element model of fixed denture for the preparation of the subsequent study such as biomechanical analysis. **Method** The computed tomography (CT) images were processed by Mimics and Geomagic studio, then the solid model and finite model were established by UG NX. **Results** A 3D finite element model of fixed denture including alveolar bone, abutment, pericementum and denture were established. **Conclusions** The use of the initial data of teeth to build finite model can avoid data loss and minimize model distortion to a certain extent, so the 3D finite element model has good similarities in geometry.

**Key words:** CT scans; Fixed denture; Finite element method; Biomechanics

传统的固定义齿修复主要依靠口腔医师的经验和技艺,故其修复结果具有很大的未知性,往往会造成交齿失效,如基牙疼痛或松动、龈齿、继发龋、修复体松动或者破坏等,给患者带来痛苦和不便。在固定义齿修复中,需考虑基牙及牙槽骨的受力情况,以期最大限度地减少患者的痛苦,确保义齿的长期有效性。因此,对基牙进行生物力学分析就显得尤为重要,而生物力学分析最先进有效的方法是有限元法<sup>[1]</sup>。建立正确的有限元模型是进行有限元分析的基础。

朱景华<sup>[2]</sup>提出了一套基于牙齿断层图像的建模方法,利用商业软件 PhotoShop、Auto CAD、SURFACER、Pro/E 进行牙齿三维 CAD 模型重构,但其数据来源是胶片,格式转换频繁,难免造成数据丢失,模型失真。张美超等<sup>[3]</sup>利用 Mimics 和 Freeform 建立了中国数字人上颌第 1 磨牙三维有限元模型,但其从 Mimics 软件中导出的模型未经处理,误差难免较大。

国内外学者和研究机构在牙齿建模方法上进行了长期的探索<sup>[1-10]</sup>,逐渐形成以下几种牙齿三维实

收稿日期:2010-07-09; 修回日期:2010-08-20

作者简介:王野平(1963-),男,教授,研究方向:摩擦学及生物医学工程。

通讯作者:林小英, Tel:15000600359; E-mail: lxy\_838@163.com。

体模型创建方法:磨片切片法<sup>[6-7]</sup>,三维测量法<sup>[8]</sup>,CT图像处理法,DICOM(Digital Imaging and Communication in medicine)建模法等。鉴于DICOM建模法较之其他几种方法有深入CT图像数据本质、最大限度避免数据丢失、减少模型失真等优点<sup>[10]</sup>,本研究采取DICOM建模法建模。根据CT图像,利用Mimics医学影像三维重建软件、Geomagic studio 逆行工程软件和Unigraphics NX 三维设计仿真软件建立自定义齿的有限元模型。

本文牙齿三维有限元建模的思路是:

(1) 数据提取。提取真实牙齿的CT断层图,直接以DICOM格式存储。

(2) 图像分割并初步建模。利用Mimics 三维医学重建软件打开DICOM格式文件,设定阈值,生成蒙罩,编辑蒙罩,计算生成实体。实体模型以STL(Standard Template Library)格式输出。

(3) 曲面优化。由于Mimics输出的模型存在较多缺陷,需对之进行优化处理。运用Goemagic studio8.0进行曲面的优化,生成较为真实美观的牙齿面模型,并以UG可识别的IGES(The Initial Graphics Exchange Specification)格式输出。

(4) 牙齿各部分的实体建模。运用UG NX(EDS, 美国)读入上步的曲面模型,进行曲面缝合生成实体模型,运用布尔运算求出模型各部分实体模型。

(5) 有限元网格划分。运用UG中FEA模块进行有限元网格划分,得到牙齿的三维有限模型,为后续的研究工作提供数字模型。

## 1 材料和方法

### 1.1 CT图像数据采集

选取1名身体健康的成年男性作为志愿者,其上牙列整齐,下牙列基本整齐,牙弓形状基本对称,颌关系正常,下颌第1磨牙(6号牙)缺失,借用第2双尖牙(5号牙)和第2磨牙(7号牙)<sup>[11]</sup>作为基牙进行全冠金属烤瓷固定义齿修复。用上海东方医院配备的GE Medical Systems的Light Speed Ultra型16层螺旋CT扫描机进行数据采集。扫描条件为:电压12 kV,电流130 mA,X线照射量168.84 mA·s。得到下颌底端至上颌上部之间共73张尺寸为512 pxl×544 pxl的CT图像,以DCT格式保存。

### 1.2 图像分割并初步建模

#### 1.2.1 生成蒙罩

选取其中的涉及下颌第2双尖牙、第1磨牙和第2磨牙的21张图像,利用Mimics 10.01打开此DCT格式文件,Z值的范围-84.96~-60.34,生成蒙罩。由于人体组织密度不同,所对应的灰度值不同,故可由灰度值区分人体各组织。各种物质对应的灰度值见表1。

表1 不同物质所对应灰度值

Tab.1 Gray values of different substances

物质	灰度值
空气	-1 204
脂肪	-110
水	0
肌肉	+40
骨松质	+100 ~ +300
骨密质	+300 ~ +2 000
牙釉质	+2 000 ~ +3 072

根据牙齿的不同组织所对应不同的灰度值,设定阈值,确定窗宽及窗位生成蒙罩,所设定阈值范围内的像素点则被置于蒙罩内。

对于牙齿外轮廓模型,设定窗宽为1 840(GV),窗位为2 151(GV)。阈值下限为1 231,阈值上限为3 071。生成蒙罩,则灰度值置于1 231~3 071之间的像素点被置于蒙罩内。区域生长可快速去除无关像素点,提高建模效率和准确性。

同样的方法创建牙髓腔、牙槽骨模型。牙髓腔蒙罩的阈值设定为-1 024~-124;牙槽骨蒙罩阈值设定为302~2 002。

#### 1.2.2 编辑蒙罩

提取图像过程中难免会产生噪音点,要想得到比较准确的牙齿模型,需要在口腔医师指导下,根据牙齿的实际情况和解剖结构进行蒙罩编辑。蒙罩编辑的主要手法包括:绘制、擦除、局部阈值划分、孔填充和布尔运算。

编辑蒙罩要依照以下3个指导准则进行。

(1) 形状正确性原则:主要是指牙齿形态结构与实际情况吻合,牙尖、牙根和牙髓腔齐全并与相应牙齿对应(见表2)。

表2 牙齿类型及其参数

Tab.2 Teeth type and the parameters

牙齿类型	牙尖数	牙根数	备注
切牙	0	1	无
尖牙	1	1	无
双尖牙	2	1~2	上颌第1双尖牙为2
磨牙	4~5	2~3	上颌牙为3,下颌牙为2

(2) 尺寸准确原则:以表3所示的中国人下颌牙恒牙尺寸平均值为参考,考虑个体尺寸差异。

表3 恒牙测量统计表(平均数)/mm

Tab.3 Permanent teeth measurement (average) statistics/mm

恒牙序号	全长/ mm	冠长/ mm	根长/ mm	冠宽/ mm	颈宽/ mm	冠厚/ mm
1	19.9	9.0	10.7	5.4	3.6	5.7
2	21.0	9.5	11.5	6.1	4.0	6.2
3	24.6	11.1	13.5	7.0	5.4	7.9
4	20.9	8.7	12.3	7.1	4.9	7.9
5	20.5	7.9	12.6	7.1	4.9	8.3
6	20.5	7.6	12.9	11.2	8.9	10.5
7	19.1	7.6	12.3	10.7	8.5	10.4
8	18.0	7.1	12.9	11.1	9.2	10.4

(3) 表面光滑原则:表面包括牙齿外表面和牙髓腔面,模型表面应平滑过渡,不应存在尖面、坏面等表面缺陷。

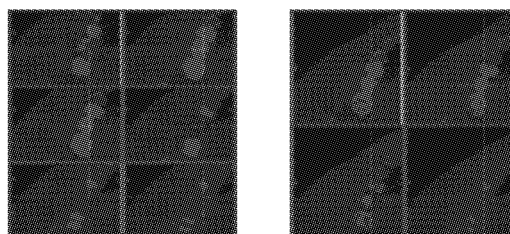
### 1.2.3 生成3D预览图

由蒙罩中的像素点自动生成三维模式,检查模型是否有不合理的形状;如有不合理形状,则再从三维模型中生成蒙罩进行编辑,直到模型形状基本符合实际情况,以 STL(Standard Template Library)格式输出。由蒙罩生成3D实体模型如图1所示。

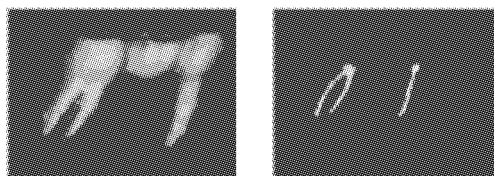
### 1.3 曲面模型优化

由于 Mimics 输出的模型表面不够光滑,存在尖面、坏面等缺陷,需进行表面光滑处理,使之更美观准确。运用美国 Raindrop 公司研发的逆向建模软件 Geomagic studio8.0 中的 CAD 模块对 Mimics 10.01 输出的模型进行曲面优化。Geomagic Studio 具有完美无缺的多边形和 NURBS 模型,能快速处理复杂形状或自由曲面形状,其生产率比传统 CAD 软件提高 10 倍,可与各种三维扫描设备和 CAD/CAM 软件进行交互,可作为一个独立的应用程序运

用于快速制造。但 Geomagic Studio 只能做出高精度的曲面,而无法建立实体模型,若要实体建模还需 UG 等专业的实体建模软件进行。



(a) 固定义齿的内外轮廓蒙罩



(b) 由蒙罩生成3D实体

图1 蒙罩编辑结果和由蒙罩生成3D实体显示

Fig.1 Mask edited results and corresponding 3D model

STL 格式文件导入 Geomagic Studio 中时已是多边形曲面,可省去传统逆向工程过程中的点云编辑和裹覆等操作。在此基础上可对表面模型进行优化处理,包括表面光滑处理、补洞、祛除表面特征、边界调整等操作。通过以上操作,牙齿模型更美观,也更接近真实的牙齿形状。

将以上假体面转化为实体面,进入到造型阶段。在此阶段,执行构造片面,构造网格,配合生成面。得到真实的曲面模型,如图2所示,并以 IGES 格式输出。



图2 3D曲面模型

Fig.2 The 3D surface model

### 1.4 实体建模

运用 UG NX 4.0 对以上操作完成的模型进行实

体建模。UG NX 有多种图形文件接口,可直接导入 STL、IGES、CATIA、Pro-E 等图形文件和模型文件。

#### 1.4.1 牙髓建模

将牙髓曲面模型导入到 UG 中,缝合所有曲面形成牙髓 3D 实体模型。

#### 1.4.2 基牙和固位体的实体建模

将固定义齿及基牙组织的曲面模型(IGES 格式)导入到 UG 中,缝合所有曲面生成整体模型。运用布尔运算求差构建出带牙髓腔的基牙模型。用曲

面切割实体模型方法创建基牙模型和固位体模型。

#### 1.4.3 牙周膜建模

运用基牙压根部分进行向外抽壳,厚度为 0.25 mm(牙周膜厚度假设为 0.25 mm)。

#### 1.4.4 牙槽骨建模

缝合牙槽骨曲面模型生成实体模型,牙周膜外表面作为切割工具将牙槽骨分为 3 部分,将无关部分删除,得到牙槽骨的实体模型。总体模型和各部分模型如图 3 所示。

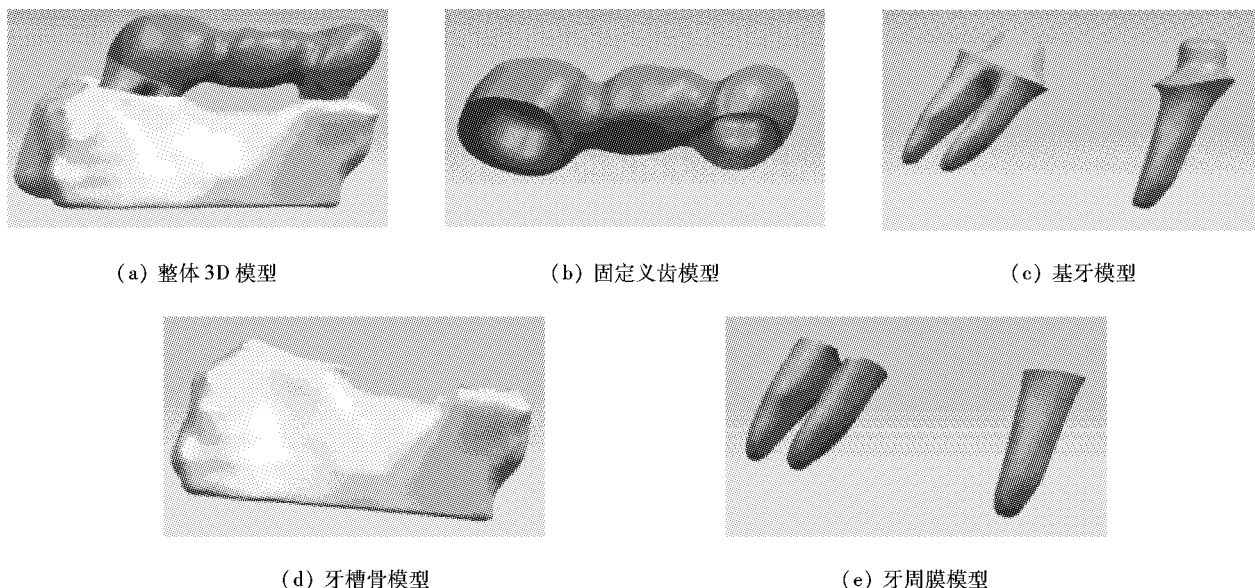


图3 总体及各部分模型

Fig.3 The whole model and parts models (a) The whole 3D model of alveolar bone; (b) The model of fixed denture; (c) The model of abutment tooth; (d) The model of alveolar bone; (e) The model of periodontal ligament

### 1.5 有限元网格划分

UG NX 集 CAD/CAM/CAE 功能于一身,能够进行高级仿真及运动仿真。UG 有限元分析模块可进行线性结构静力分析、线性结构动力分析、模态分析等。

在 UG 高级仿真环境下创建 FEM 文件,对模型进行网格划分。网格类型为 3D 四面体网格,单元尺寸大小设置为 1.4,中节点设置为混合,最大雅可比矩阵为 10,UG 有限元求解器自动对整个模型(共 6 个实体)进行网格划分(见图 4)。

### 1.6 材料力学参数

参考前人研究的结果,基牙、固定义齿、牙槽骨及牙周膜的材料力学参数(见表 4)。

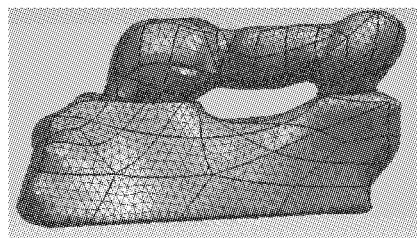


图4 有限元模型

Fig.4 Finite element model

### 1.7 接触面及边界条件设定

在真实的牙齿咀嚼过程中,义齿、基牙、牙周膜等结构的运动是相对于颌骨(牙槽骨)的。因此,确定牙槽骨模型底端面为固定面,设定这个面上的所

表 4 相关材料的力学参数

Tab.4 Mechanical parameters of materials

材料	E/GPa	$\mu$
基牙	18.6	0.31
固定义齿	100.0	0.31
牙槽骨	13.7	0.30
牙周膜	0.068	0.45

有节点的自由度为 0。

## 2 结果

运用 Mimics 医学影像三维重建软件、Geomagic Studio 逆向工程软件和 UG NX 三维建模仿真软件建立了固定义齿及基牙有限元模型。第 2 磨牙总长 18.80 mm,冠长 7.93 mm,根长 11.44 mm;第 2 双尖牙总长 20.20 mm,冠长 7.85 mm,根长 12.32 mm;牙周膜厚度 0.25 mm。缺失牙部分牙槽骨吸收量为 15%。CT 图像中,包含第 2 磨牙的 CT 片 z 值在 -78.81 ~ -60.34 mm,总高度 18.47 mm;包含第 2 双尖牙的 CT 片 z 值在 -80.04 ~ -60.34 mm,总高度为 19.70 mm。可见所建模型长度与真实牙齿基本相符,也与牙齿同统计结果(见表 3)基本相符。对模型进行网格划分,网格划分结果:第 2 磨牙包含 9 779 个节点,5 500 个单元;第 2 双尖牙包含 6 338 个节点,3 525 个单元;牙槽骨包含 45 444 个节点,28 276 个单元;固定义齿(固位体)包含 15 244 个节点,9 132 个单元;磨牙牙周膜包含 6 046 个节点,2 953 个单元;尖牙牙周膜包含 3 467 个节点,1 793 个单元。

## 3 讨论

有限元法是一种广泛应用于工程科学领域的数学方法。自 1974 年美国密执安大学的 Farah<sup>[12]</sup> 教授最先将有限元法引入了口腔医学领域起,有限元法在口腔医学领域就得到了很好的发展。随着计算机技术的不断发展,目前应用于口腔医学领域中的有限元法已由二维转化为三维。学者们应用各种工程方法对口腔的软、硬组织和修复体的受力情况进行了一系列的研究,逐渐形成了现代口腔生物力学。三维有限元分析方法成为生物力学研究的重要手段之一,有限元法为口腔疾病治疗方法的评价及修

用材料的研究、开发和应用提供了力学基础。建立有限元模型是进行固定义齿修复中生物力学分析的前提,模型的几何相似性和材料相似性是确保有限元分析结果可靠性的基础。

本研究基于人体头颅部分的 CT 图像,采用 DICOM 直接建模法,一定程度上避免格式转换带来的数据丢失情况发生,减少几何失真,所以 DICOM 直接建模法所建的模型具有更高的精准度。由于牙齿的形状比较复杂,牙齿的外表面曲面也有很大的差别,很难找到一个通用方程建立这些曲面,故应用单一的三维建模软件如 UG NX 或者 PRO-E 等都难以完成牙齿建模。该研究综合利用 Mimics 医学三维重建软件、Geomagic 逆向工程软件和 UG NX 实体建模软件,建立了相对符合牙齿实际形状的固定义齿修复模型。后续的研究将对其牙槽骨出现不同程度吸收的状况下的基牙及其支持组织(牙周膜、牙槽骨)进行生物力学分析,研究牙槽骨萎缩给基牙带来的影响。口腔医师可将研究结果对义齿修复患者进行修复效果预估测。

CT 图像获取过程中,因 CT 机带入的原始误差,受试对象与仪器之间相对运动,使得 Mimics 自动建立的模型表面有或多或少的缺陷,比如表面过渡不平滑,有尖面、坏面或曲面扭曲等缺陷。本研究利用 Geomagic studio 逆行工程软件进行曲面优化,使得模型曲面更美观,也更接近牙齿的真实形状。牙列缺损的患者往往伴随着牙周疾病,表现为牙周膜破损、牙槽骨吸收等。根据临床经验,牙槽骨吸收超过 50% 者不适合选作基牙,故后续的研究将会对牙槽骨出现不同程度吸收状况下基牙及其组织进行受力分析,该模型将为后续的研究奠定基础。

需要指出的是该研究也存在一定的局限性。首先,模型的精确度其实还与原始数据即 CT 图像有很大的关系,比如扫描过程有无晃动,CT 断层扫描的层间距等。好的数据源是建立精确有限元模型的基础,因此要采取更好的手段获取更加精确的原始数据。其次,牙齿的解剖结构本来应该包含牙釉质、牙骨质、牙本质和牙髓腔等,理论上应该区分牙釉质、牙本质等组织。但考虑到这几种组织的灰度值相差不大,牙釉质、牙本质的生物物理性能相似,区分这些组织对提高有限元分析的准确度作用有限,但是却会增大建模及有限元分析的难度。考虑到实

用性,本文未对这些组织进行细分,视基牙的实体部分材料为单一均质的材料。另外本文将牙周膜材料定义为各向同性、等厚度、粘性材料。希望其他研究者提出更好的更加逼近牙齿真实情况的建模方法。

#### 参考文献:

- [1] 肖捷,张朝跃,李昱菟,等. 构建寰枢椎前路融合后三维有限元模型及生物力学分析[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2009,13(30):5823-5826.
- [2] 朱景华. 基于牙齿结构断层图像的三维 CAD 建模[J]. 机电工程, 2008, 25(11):105-107.
- [3] 张美超,刘阳,刘则玉,等. 利用 Mimics 和 Freeform 建立中国数字人上颌第一磨牙三维有限元模型[J]. 医用生物力学, 2006,21(3):208-211.
- [4] Kibi M, Ono T, Dong J, *et al.* Development of an RPD CAD system with finite element stress analysis [J]. Oral Rehabil, 2009, 36:442-450.
- [5] LMuraru, C Van Lierdeb, I Naert, *et al.* Three-dimensional finite element models based on in vivo microfocus computed tomography: elimination of metal artefacts in a small laboratory animal model by registration with artefact-free reference images [J]. Materialise Dental NV, 2009, 40(11):1207-1210.
- [6] 潘炜娟,张保卫,叶少波,等. 牙齿与桩核三维有限元建模的初步探讨[J]. 口腔颌面修复学杂志, 2000,1(3):143-144.
- [7] 夏荣. 有限元法及其进展[J]. 中国口腔种植学杂志, 1997,2(3):96-100.
- [8] 魏斌. 牙颌系统三维有限元建模方法的进展[J]. 口腔材料器械杂志, 2002,11(2):86-87.
- [9] 韩强. 应用于口腔医学领域的三维测量技术[J]. 口腔材料器械杂志, 2003,12(1):39-41.
- [10] 赵峰,高勃,刘震侠,等. Dicom 标准和 Mimics 软件辅助建立下颌骨三维有限元模型[J]. 西南国防医药, 2005,15(5):479-481.
- [11] 皮昕. 口腔解剖生理学[M]. 北京:人民卫生出版社, 1987:4-25.
- [12] Farah JW, Craig RG. Finite element stress analysis of a restored axisymmetric first molar [J]. Dent Res, 1974, 53(4):859-866.
- [14] Rodan GA, Martin TJ. Role of osteoclasts in hormonal control of bone resorption—a hypothesis[J]. Calcif Tissue Int, 1981, 33: 349-351.
- [15] Takahashi N, Akatsu T, Uadagawa N, *et al.* Osteoblastic cells are involved in osteoclast formation[J]. Endocrinology, 1988, 123: 2600-2602.
- [16] Tanaka Y, Maruo A, Fujik, *et al.* Intercellular adhesion molecule 1 discriminates functionally different populations of human osteoblasts: characteristics involvement of cell cycle regulations [J]. J Bone Miner Res, 2000, 15(10): 1912-1923.
- [17] Simonet WS, Lacey DL, Dunstan CR, *et al.* Osteoprotegerin: a novel secreted protein involved in the regulation of bone density[J]. Cell, 1997, 89(2): 309-319.
- [18] Lacey DL, Timms E, Tan HL, *et al.* Osteoprotegerin ligand is a cytokine that regulates osteoclast differentiation and activation[J]. Cell, 1998, 93(2): 165-176.
- [19] Tanaka S, Takahashi N, Udagawa N, *et al.* Macrophage colony-stimulating factor is indispensable for both proliferation and differentiation of osteoclast progenitors[J]. J Clin Invest, 1993, 91: 257-263.
- [20] Anderson DM, Maraskovsky E, Billingsley WL, *et al.* A homologue of the TNF receptor and its ligand enhance T-cell growth and dendritic-cell function [J]. Nature, 1997, 390(6656): 175-179.
- [21] Yashuda H, Shima N, Nakagawa N, *et al.* A novel molecular mechanism modulating osteoclast differentiation and function[J]. Bone, 1999, 25(1): 109-113.
- [22] Rubin J, Fan X, Biskobing DM, *et al.* Osteoclastogenesis is repressed by mechanical strain in an in vitro model[J]. J Orthop Res, 1999, 17(5): 639-645.

(上接第 432 页)